

Научная статья

УДК 621.313

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-49-63

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ МАЛОМОЩНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕФТЕПРОВОДАХ В УДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

**Александр Витальевич Барвинов****Alexander V. Barvinov**

аспирант кафедры электроэнергетики,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия

**Рустам Нуриманович Хамитов****Rustam N. Khamitov**

доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия;
профессор кафедры электрической техники,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Лидия Сергеевна Ганичева****Lidia S. Ganicheva**

студент 4-го курса, ПИ-191,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия

**Сергей Николаевич Жеребцов****Sergey N. Zhrebtsov**

кандидат технических наук,
доцент кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия

Актуальность

Отключение электроснабжения в отдаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера может иметь серьезные последствия, включая техногенные катастрофы, экологические катастрофы, пожары, взрывы, загрязнение водных ресурсов, воздействие на здоровье людей и экономические потери. Для обеспечения электроснабжения в районах с суровым климатом рассматриваются различные автономные источники питания, включая гидрокинетическую турбину, установленную внутри трубопровода, которая преобразует кинетическую энергию потока в электроэнергию с помощью электрогенератора.

Ключевые слова

нефтепровод,
гидрокинетическая
турбина,
турбогенераторная
электростанция,
электроприемник,
автономное
энергоснабжение

Объект исследования

Объектом исследования является эффективное электроснабжение потребителей нефтегазопроводов в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера, гидравлическая электростанция малой мощности, установленная на обводной технологической линии нефтепровода.

Цель исследования

Целью исследования является оценка возможности применения гидрокинетической турбины внутри трубопровода для эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов в удаленных районах.

Методы исследования

В процессе исследования проводился анализ существующих электростанций малой мощности с точки зрения определения наиболее перспективных и эффективных подходов к выработке электроэнергии, а также было предложено теоретическое решение в форме гидрокинетической турбины для генерации электроэнергии.

Результаты и значимость исследования

Гидрокинетическая турбина, установленная внутри трубопровода, предлагается в качестве автономного источника питания для эффективного электроснабжения потребителей. Предлагается модель гибридной электростанции, объединяющей гидрокинетическую турбину с другими источниками энергии для обеспечения непрерывного электропитания в удаленных районах.

Полученные результаты имеют практическую значимость для энергетической обеспеченности нефтегазопроводов в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера. Предложен новый подход к электроснабжению, что в результате внедрения разработанного оборудования может обеспечить бесперебойную работу энергетического модуля технологического оборудования, установленного на нефтепроводах, и помочь в предотвращении техногенных катастроф и экономических потерь.

Для цитирования: Барвинов А. В., Хамитов Р. Н., Ганичева Л. С., Жеребцов С. Н. Электроснабжение маломощных потребителей, установленных на нефтепроводах в удаленных районах Крайнего Севера // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 49-63. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-49-63>.

Original article

POWER SUPPLY FOR LOW-POWER CONSUMERS INSTALLED ON OIL PIPELINES IN REMOTE AREAS OF THE FAR NORTH

Relevance

The power outage in remote and inaccessible areas of the Far North can have serious consequences, including technological and ecological disasters, fires, explosions, water pollution, impact on human health, and economic losses. To ensure power supply in harsh climate areas, various autonomous power sources are being considered, including a hydrokinetic turbine installed inside the pipeline, which converts the kinetic energy of the flow into electricity using an electromechanical generator.

Object of study

The research focuses on the efficient power supply of oil and gas pipeline consumers in remote and inaccessible areas of the Far North. A small-scale hydraulic power station is installed on the bypass line of the oil pipeline.

Keywords

oil pipeline, hydrokinetic turbine, turbo-generator power station, power receiver, autonomous power supply

Aim of research

The main aim of the study is to assess the feasibility of using a hydrokinetic turbine inside the pipeline for efficient power supply to linear consumers of oil and gas pipelines in remote areas.

Research methods

During the research, an analysis of the field of existing small-scale power plants was carried out to determine the most promising and efficient approaches to electricity generation. Additionally, a theoretical solution in the form of a hydrokinetic turbine for electricity generation was proposed.

Results

The results and significance of the research propose the hydrokinetic turbine installed inside the pipeline as an autonomous power source for efficient power supply to consumers. A hybrid power station model is suggested, combining the hydrokinetic turbine with other energy sources to ensure uninterrupted power supply in remote areas.

The obtained results have practical significance for the energy provision of oil and gas pipelines in remote and inaccessible areas of the Far North. A new approach to power supply is proposed, which, upon implementation of the developed equipment, can ensure uninterrupted operation of the energy module of the technological equipment installed on the pipelines and help prevent technological disasters and economic losses.

For citation: Barvinov A. V., Khamitov R. N., Ganicheva L. S., Zherebtsov S. N. Elektrosnabzheniye malomoshchnykh potrebiteley, ustanovlennyykh na nefteprovodakh v udalennykh rayonakh Kraynego Severa [Power Supply for Low-Power Consumers Installed on Oil Pipelines in Remote Areas of the Far North]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 32, Vol. 19, pp. 49-63 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-49-63>.

Введение

Отключение электроснабжения потребителей трубопроводов в отдаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера и Сибири может иметь серьезные последствия, вплоть до возникновения техногенных катастроф, которые включают экологические катастрофы, пожары и взрывы, загрязнение водных ресурсов, воздействие на человеческое здоровье и экономические потери и т.д. Основываясь на сведениях о состоянии аварийности на нефтепроводах за 12 месяцев (по данным Природнадзора Югры с 01.01.2020 по 31.12.2020), подтверждается возможность возникновения серьезных техногенных проблем в результате аварийных ситуаций на нефтепроводах. Сведения в таблице 1 отражают релевантные данные, свидетельствующие о масштабах и характере данных проблем [1].

Узлы запорной арматуры, разработанные для осуществления контроля и управления над потоками транспортируемых продуктов, обслуживания, ремонта и минимизации негативного воздействия на окружающую среду, включают:

1. задвижки: позволяют открыть и закрыть поток жидкости в трубопроводах для контроля и управления;
2. вентили: используются для регулирования и контроля потока жидкости, включая регулирование скорости и направления потока;
3. клапаны: предотвращают обратный поток жидкости и защищают систему от нежелательного протекания;
4. затворы: применяются для полного перекрытия потока жидкости, особенно в случаях аварий или планового обслуживания;

5. шаровые краны: обеспечивают перекрытие потока за счет запирающего элемента в форме шара, но не предназначены для регулирования потока.

Электроприводная запорная арматура с дистанционным управлением работает на напряжении 220, 380 В.

Самая распространенная причина разливов нефтепродуктов — внутренняя коррозия трубопровода (например, за 2020 год из 888 аварий более 500 произошли именно по этой причине). Также среди причин аварий, это — внешняя коррозия металла, вызванная погодными условиями региона и строительным браком.

Автономные источники питания для обеспечения надежности электроснабжения в линейных нефтепроводах: анализ и сравнительная оценка

Электропотребители нефтегазопроводов относятся к третьей категории надежности электроснабжения в соответствии с техническим регламентом Газпрома 2-6.2-1028-2015 «Категорий-

ность электроприемников промышленных объектов ПАО «Газпром»» [2]. Питание электроприемников нефтепровода осуществляется на напряжении 0,4 кВ, распределение электроэнергии выполняется от трансформаторных подстанций, которые подключаются к линиям электропередачи на напряжение 6(10), 35кВ. Расположение трансформаторных подстанций вдоль нефтегазопроводов обусловлено необходимостью обеспечения электроэнергией разнообразных систем и устройств, функционирующих на трубопроводах.

Электропотребитель нефтепровода представляет собой техническое оборудование [2], установленное вдоль магистральных трубопроводов, которое обеспечивает контроль, мониторинг и управление потоками жидкости в процессе перекачки нефтепродуктов по трубопроводу [3]. Электрические подстанции обеспечивают электропитанием насосные станции, компрессорные установки, клапаны, измерительные и регулирующие механизмы, системы контроля и управления, а также осветитель-

Таблица 1. Сведения о состоянии аварийности на нефтепроводах за 12 месяцев 2020 г. (по данным Природнадзора Югры с 01.01.2020 по 31.12.2020)

Table 1. Information about the accident rate on oil pipelines for the 12 months of 2020 (according to the data from the Department of Environmental Supervision of Yugra from January 1, 2020 to December 31, 2020)

Районы, в которых произошли аварии (ХМАО)	Количество аварий	Масса загрязняющих веществ (нефть), т		Площадь загрязнения, га
		В момент аварии	После ликвидации аварии	
Ханты-Мансийский район	40	14,3840	0,0000	6,4420
Нижневартовский район	503	116,6010	8,2530	36,2360
Сургутский район	34	5,0410	0,0000	2,3010
Советский район	4	0,1000	0,0000	0,0820
Октябрьский район	40	5,2180	0,0000	3,5570
Березовский район	0	0,0000	0,0000	0,0000
Нефтеюганский район	267	163,8680	0,0000	30,5200
ВСЕГО	888	305,2120	8,2530	79,1380

ные средства и иные электропотребители, размещенные вдоль линии трубопроводов [4, 5]. В удаленных и труднодоступных районах, где отсутствуют сетевые, стационарные источники электропитания, при соответствующем технико-экономическом обосно-

вании применяются различные автономные источники питания (таблица 2) вместо передачи электроэнергии от сетевой инфраструктуры электроснабжения. Эти потребители включают насосные и компрессорные станции, мониторинговые системы, клапаны и регуля-

Таблица 2. Сводная таблица, содержащая преимущества и недостатки автономных источников питания

Table 2. A summary table containing the advantages and disadvantages of autonomous power sources

Автономный источник питания	Преимущества	Недостатки
Дизель-генераторные установки (ДГУ)	- Высокая надежность и стабильность питания - Гибкость в управлении мощностью (ток, напряжение) - Широкое распространение и доступность	- Выбросы вредных веществ и шумовые эмиссии - Зависимость от поставок и хранения дизельного топлива
Ветро-солнечные электростанции	- Экологически чистый источник энергии - Возобновляемые ресурсы - Независимость от внешних поставок энергии	- Зависимость от погодных условий и сезонности - Непостоянность генерации энергии
Малые газовые электростанции	- Высокая энергетическая эффективность - Независимость от поставок дизельного топлива и электрической сети	- Выбросы углекислого газа при сжигании газа - Требование постоянного источника газа
Автономные источники питания на базе двигателя Стирлинга	- Экологически чистый источник энергии - Работа на различных источниках тепла	- Низкая энергетическая эффективность - Ограниченная доступность топлива
Термоэлектрические генераторы (ТЭГ)	- Высокая надежность и долгий срок службы - Не требуют движущих частей и механического обслуживания	- Низкая энергетическая эффективность - Ограниченная мощность
Турбодетандерные генерирующие агрегаты	- Высокая энергетическая эффективность - Компактность	- Высокие инвестиционные затраты - Требуется специализированное обслуживание и эксплуатация
Каталитические термоэлектрические энергоустановки, топливные элементы	- Высокая энергетическая эффективность - Не требуют движущих частей и механического обслуживания	- Высокая стоимость топливных элементов и их ограниченный срок службы - Зависимость от наличия каталитического материала и требование высокой чистоты топлива

торы, а также системы безопасности и контроля пожара [5].

В выборе автономного источника питания [2] учитываются уникальные требования каждого конкретного случая, расположение и климатические условия региона. Решение опирается на анализ погодных данных региона, доступности ресурсов, стоимости, экологических факторов и других соответствующих параметров, связанных с конкретным применением. Окончательное решение принимается на основе анализа всех факторов и выбора оптимального источника питания, обеспечивающего энергетическую независимость и эффективность работы системы управления трубопроводов.

Применение гидрокинетической турбины для эффективного электроснабжения потребителей нефтепроводов в удаленных районах

На основе предоставленной и рассмотренной информации установлено, что проблемой является обеспечение эффективного электроснабжения потребителей нефтепроводов в удаленных и труднодоступных районах, где отсутствуют сетевые источники электропитания [6].

Для решения этой проблемы предлагается рассмотреть использование гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода. Однако важно отметить, что при использовании турбины, установленной внутри трубопровода, могут возникать дополнительные потери скорости и давления в самом трубопроводе. Тем не менее преимущества такого подхода заключаются в экономии ресурсов по сравнению с передачей электроэнергии по линиям электропередачи (ВЛ) на начальном этапе эксплуатации месторождения.

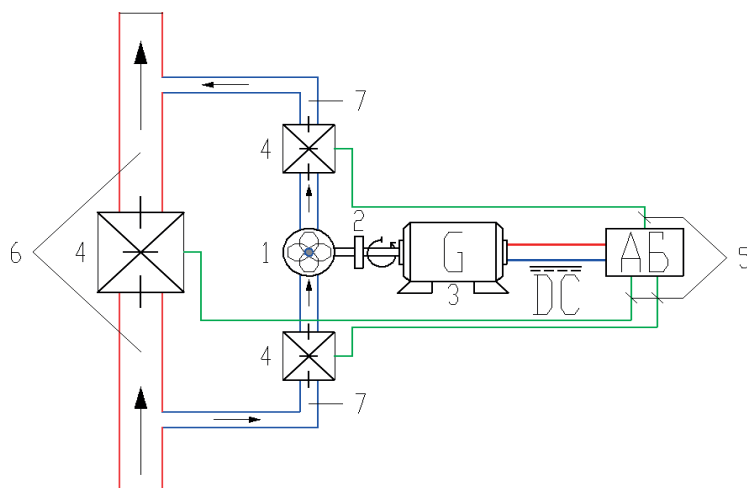
Для оценки эффективности и надежности гидрокинетической турбины,

установленной внутри трубопровода, в контексте обеспечения эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов требуется провести анализ технических характеристик данной турбины, оптимизировать ее конструкцию и процесс преобразования энергии, разработать систему управления и контроля, а также оценить экономическую эффективность данного решения. Такое исследование позволит получить более глубокое понимание возможностей эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов с использованием гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода. Это имеет важное практическое значение для энергетической обеспеченности технологического оборудования в районах Крайнего Севера и Сибири.

Проведено исследование возможности применения гидрокинетической турбины в качестве автономного источника питания (АИП) для обеспечения энергетических потребностей технологического оборудования в удаленных и труднодоступных районах. Гидрокинетическая турбина является устройством, использующим принцип гидрокинетического преобразования энергии [3], при котором кинетическая энергия потока жидкости преобразуется в механическую энергию вращающегося ротора. Впоследствии с использованием установленного генератора на валу гидротурбины осуществляется преобразование механической энергии в электрическую энергию (рисунок 1).

На рисунке 1 изображена структурная схема гидрокинетической электростанции, размещенной на нефтепроводе, состоящей из следующих компонентов.

1. Турбина является устройством, осуществляющим преобразование кинетической энергии потока нефти в механическую энергию вращения. Она состоит из ротора с лопастями, которые



1 — турбина; 2 — редуктор; 3 — генератор; 4 — узловая запорная арматура;
5 — кабельная линия; 6 — магистральный трубопровод; 7 — байпас

1 — turbine; 2 — gearbox; 3 — generator; 4 — main shut-off valves; 5 — cable line;
6 — main pipeline; 7 — bypass

Рисунок 1. Структурная схема гидрокинетической электростанции, размещённой на нефтепроводе

Figure 1. The structural diagram of a hydrokinetic power station located on an oil pipeline

подвергаются действию потока нефти, передавая механическую энергию валу генератора.

2. Редуктор выполняет функцию механической трансформации энергии, получаемой от вращения турбины, на другой уровень вращения. Он способен изменять скорость вращения и преобразовывать момент силы.

3. Генератор преобразует механическую энергию, полученную от гидрокинетической турбины, в электрическую энергию. Он состоит из статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть), где вращение ротора индуцирует электрический ток в обмотках статора.

4. Узловая запорная арматура представляет собой систему клапанов и задвижек, обеспечивающих регулирование потока нефти в гидрокинетической электростанции. Она используется для контроля объема и скорости потока, а также для отключения или переключения между различными частями системы.

5. Кабельная линия представляет собой проводную сеть, предназначен-

ную для передачи сгенерированной электрической энергии от генератора к другим устройствам или электросетям. Она состоит из проводов, изолирующих материалов и защитных оболочек.

6. Магистральный трубопровод представляет собой длинную систему труб, предназначенную для транспортировки нефти на большие расстояния. В данном контексте магистральный трубопровод служит источником потока нефти для гидрокинетической электростанции.

7. Байпас является дополнительным путем или каналом, который позволяет обойти или обходить основную систему. В данном случае байпас может использоваться для перенаправления потока нефти, если требуется обслуживание или отключение гидрокинетической электростанции, позволяя нефти свободно протекать по магистральному трубопроводу без препятствий.

В результате проведенных исследований была разработана модель гибридной электростанции, объединяющей гидрокинетическую турбину с другими источ-

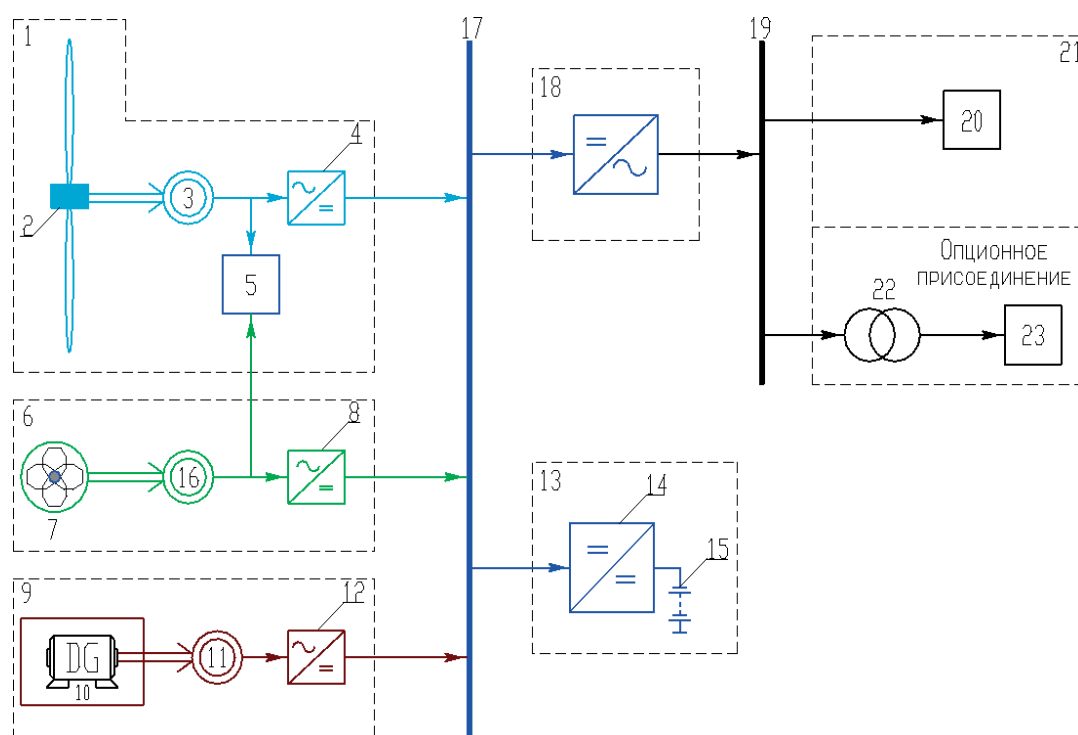
никами энергии, ветроэнергетической установкой и дизельным двигателем. Такое сочетание различных источников энергии обеспечивает повышенную надежность и непрерывность электропитания в удаленных районах, где отсутствуют сетевые источники питания (рисунок 2).

На рисунке 2 изображена структурная схема гибридной электростанции, состоящей из следующих компонентов.

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ): представляет собой систему с ветротурбиной (2), которая преобразует кинетическую энергию ветра в механическую энергию вращения.

Синхронные электромашинные генераторы (3, 11, 16) преобразуют механическую энергию, полученную от турбин, в электрическую энергию.

Выпрямители (4, 8, 12) осуществляют преобразование переменного тока, полу-



- 1 — ветроэнергетическая установка; 2 — ветротурбина; 3, 11, 16 — асинхронный электромашинный генератор; 4, 8, 12 — управляемый выпрямитель; 5 — блок балластных нагрузок; 6 — гидрокинетическая энергоустановка; 7 — турбина; 9 — блок ДЭС; 10 — дизельный двигатель; 13 — буферный накопитель энергии; 14 — двунаправленный импульсный преобразователь; 15 — блок аккумуляторных батарей; 17 — шина постоянного тока; 18 — инвертор напряжения; 19 — шина переменного тока 220/380В, 50 Гц; 20 — потребители электроэнергии; 21 — объект децентрализованного потребителя; 22 — силовой повышающий трансформатор; 23 — потребители электроэнергии высокого напряжения

- 1 — wind energy installation; 2 — wind turbine; 3, 11, 16 — asynchronous electric machine generator; 4, 8, 12 — controlled rectifier; 5 — ballast load block; 6 — hydrokinetic energy installation; 7 — turbine; 9 — power plant block; 10 — diesel engine; 13 — energy buffer storage; 14 — bidirectional pulse converter; 15 — battery block; 17 — direct current bus; 18 — voltage inverter; 19 — 220/380V, 50Hz alternating current bus; 20 — electrical energy consumers; 21 — decentralized consumer object; 22 — power boosting transformer; 23 — high voltage electrical energy consumers

Рисунок 2. Структурная схема гибридной электростанции, размещённой на нефтепроводе

Figure 2. Structural diagram of a hybrid power station located on an oil pipeline

ченного от генераторов, в постоянный ток. Вставка из шины постоянного освобождает генерирующие устройства от влияния друг на друга, тем самым исключив возникновение возмущений в работе.

Блок балластных нагрузок представляет собой устройство, используемое для стабилизации работы системы и поддержания равновесия мощности.

Гидрокинетическая энергоустановка состоит из турбины (7), которая использует поток жидкости в нефтепроводе для преобразования кинетической энергии в электрическую энергию.

Блок дизельной электростанции (ДЭС) включает в себя дизельный двигатель (10), который служит для генерации электрической энергии в случае отсутствия достаточного поступления энергии от других источников.

Буферный накопитель энергии представляет собой устройство, используемое для временного хранения избыточной электрической энергии, полученной от генераторов или других источников, чтобы обеспечить постоянную поставку энергии при изменяющейся потребности.

Двухнаправленный импульсный преобразователь служит для преобразования электрической энергии между постоянным и переменным током.

Блок аккумуляторных батарей представляет собой систему аккумуляторов, используемых для хранения электрической энергии и обеспечения резервного источника питания.

Шина постоянного тока используется для передачи постоянного тока между компонентами системы.

Инвертор напряжения осуществляет преобразование постоянного тока в переменный ток с требуемыми характеристиками напряжения и частоты.

Изолированная шина переменного тока 220 В, 50 Гц представляет собой систему передачи переменного тока низ-

кого напряжения к потребителям электроэнергии.

Потребители электроэнергии являются конечными получателями электрической энергии и используют ее для своих нужд.

Объект децентрализованного потребителя представляет собой отдельный потребитель, который получает электрическую энергию от гибридной электростанции.

Силовой повышающий трансформатор используется для повышения напряжения электроэнергии перед передачей ее к высоковольтным потребителям.

Потребители электроэнергии высокого напряжения представляют собой потребителей, которые требуют электрическую энергию с высоким напряжением для своего функционирования.

В целом, использование гидрокинетической турбины в гибридной электростанции представляет собой перспективное решение для обеспечения энергетических потребностей в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера и Сибири, где доступ к сетевым источникам электроэнергии ограничен, отсутствует или требует больших капитальных затрат. Дальнейшие исследования и развитие этой технологии могут привести к еще более эффективному использованию малых источников энергии и повышению надёжности потребителей в регионах с ограниченной инфраструктурой.

Применение асинхронного генератора с мультипликатором в системе генерации электроэнергии для потребления в пункте мониторинга и контроля магистрального трубопровода

Для оценки потребления электроэнергии в пункте мониторинга, контроля, безопасности и аварийного управления технологическим оборудованием маги-

стрального трубопровода, который позволяет контролировать основные параметры состояния потребителей, а также формировать и передавать сигналы состояния и телеуправления, представлен на рисунке 3. Предположим следующие средние значения мощности для каждого компонента.

1. Электронный манометр (ДМ5002М), для нефтяной среды, с пределами измерений 16 МПа. Климатическое исполнение У2 (от -55°C до $+70^{\circ}\text{C}$), класс точности — 1, степень защиты IP54. Напряжение питания — 24; 35 В постоянного тока, потребляемая мощность приборов не более 4,2 Вт, согласно технической документации производителя [7].

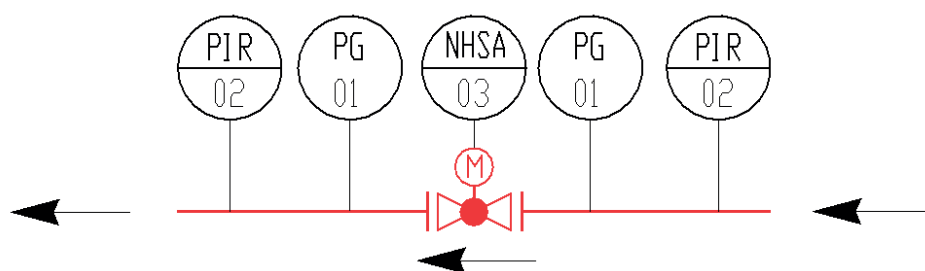
2. Датчик избыточного давления (МЕТРАН-150TG), для нефтяной среды, с выходным сигналом 4-20 мА/HART, вид взрывозащиты — Exd. Климатическое исполнение (от -55°C до 85°C), степень защиты IP54. Напряжение питания — 12–42 В постоянного тока, потребляемая мощность приборов не более 0,9 Вт, согласно технической документации производителя [8].

3. Арматурный блок содержит в себе узловую запорную арматуру DN 250 мм,

PN 6,3 МПа, тип привода — электрический с ручным дублером, время закрытия/открытия, от 60 до 100 с, мощность электропривода, не более 3 кВт (во время срабатывания задвижки электроснабжение обеспечивается АКБ) [9], напряжение питания — 220 В переменного тока, управляющий сигнал снабжается от напряжения питания — 24 В постоянного тока. Система связи передачи по ВОЛС. Коммутатор Layer3 с постоянным энергопотреблением 40 Вт.

4. Секция нагревательная взрывозащищенная РИЗУР [10] предназначена для электрообогрева системы связи и технологического оборудования в виде узла запорной арматуры, снабжается от сети переменного напряжения 220 В, с частотой 50 Гц, потребляемая мощность 50 Вт. Сопротивление изоляции, 20 МОм, температура окружающей среды при эксплуатации (от -60°C до 60°C). Применяется для обогрева узла запорной арматуры, совмещенного бокса системы связи и АКБ.

Пункт мониторинга и системы контроля имеет постоянных потребителей в виде датчиков, системы связи и переменного потребителя в виде узла запорной



Направление движения потока жидкости

PIR — датчик избыточного давления; PG — манометр; NHSA — электропривод запорной арматуры

PIR — excess pressure sensor; PG — pressure gauge; NHSA — electric actuator of shut-off valves

Рисунок 3. Схема пункта мониторинга, контроля, безопасности и аварийного управления технологическим оборудованием магистрального трубопровода

Figure 3. Scheme of monitoring, control, safety and emergency management of technological equipment of a main pipeline

арматуры. Приборы (манометры, датчики избыточного давления), устанавливаемые открыто на наружных технологических площадках, приспособлены к эксплуатации в условиях низких температур окружающего воздуха (климатическое исполнение –55 °С до 70 °С) и не требуют дополнительного обогрева.

Определим постоянные нагрузки узла запорной арматуры:

$$P_{\text{уст.д.}} = \sum P_i \cdot n_i \text{ [Вт]}, \quad (1)$$

где P_i — мощность датчиков;

n_i — количество датчиков;

$P_{\text{уст.д.}}$ — суммарная мощность датчиков.

$$P_{\text{об.}} = \sum P_{i.\text{об.}} \cdot n_i \text{ [Вт]}, \quad (2)$$

где $P_{i.\text{об.}}$ — мощность обогрева компонентов;

n_i — количество термочехлов.

$$P_{\text{уст.}} = P_{\text{уст.д.}} + P_{\text{об.}} + P_{\text{св.}} \text{ [Вт]}, \quad (3)$$

где $P_{\text{уст.}}$ — мощность постоянных нагрузок;

$P_{\text{св.}}$ — мощность устройства связи.

Таким образом, среднее потребление электроэнергии для пункта мониторинга и системы контроля и безопасности магистрального трубопровода в зависимости от потребляемых электрических нагрузок потребителей (таблица 3) составляет 150,2 Вт.

Для гарантированного электропитания оборудования предусматривается

система бесперебойного электропитания в составе источника бесперебойного питания ИБП (с запасом 10 %) Rectifier 5U 4000 ВА, который обеспечивает электроснабжение по постоянному току напряжением 24 В и по переменному току напряжением 220 В, аккумуляторные батареи емкостью 195 А·ч. Такой резерв обеспечивает непрерывную работу оборудования на период прерывания генерации электроэнергии в течение: 24 ч для датчиков, теплоизоляционной оболочки с греющим элементом (термочехол) и устройств связи; цикла открытия/закрытия запорной арматуры в течение 300 с (с учетом резерва) [4]:

$$P_{\text{АКБ}} = P_{\text{зад.}} + P_{\text{уст.}} = 3000 + 150,2 = 3150,2 \text{ [Вт]}, \quad (4)$$

где $P_{\text{АКБ}}$ — мощность АКБ;

$P_{\text{зад.}}$ — мощность электродвигателя задвижки 3000 [Вт].

$$S_{\text{ИБП}} = \frac{(P_{\text{уст.}} \cdot t_{\text{рас.п.}})}{U_{\text{ибп}}} + \frac{(P_{\text{зад.}} \cdot t_{\text{рас.в.}})}{U_{\text{ибп}}} = 150,2 + 12,5 = 162,7 \text{ [В·А]}, \quad (5)$$

где $S_{\text{ИБП}}$ — суммарная мощность ИБП;

$t_{\text{рас.п.}}$ — расчетное время резерва для постоянной нагрузки [ч];

$t_{\text{рас.в.}}$ — расчетное время резерва для временной нагрузки [ч];

$P_{\text{зад.}}$ — мощность задвижки узла запорной арматуры [Вт];

$U_{\text{ИБП}}$ — напряжение ИБП [В].

Таблица 3. Расчет электрических нагрузок потребителей

Table 3. Calculation of electrical loads of consumers

Наименование ЭП	Количество ЭП	Номинальная (установленная) мощность, Вт	
		одного ЭП	общая
Узел запорной арматуры (постоянный потребитель)			
Электронный манометр	2	4,2	8,4
Датчик избыточного давления	2	0,9	1,8
Секция нагревательная	2	50	100
Система связи	1	40	40
Итого по постоянным потребителям электроэнергии	7	—	150,2

Для определения минимальной мощности турбины ($P_{\text{тур}}$), принимаем диапазон КПД (η) турбины 55–65 % [11]:

$$P_{\text{тур}} = \frac{P_{\text{уст.}}}{\eta} = \frac{150,2}{0,60} = 250,3 \text{ [Вт]}. \quad (6)$$

Таким образом, для того чтобы гидрокинетическая турбина покрывала электрическую нагрузку потребителя мощностью 150,2 Вт, минимальная мощность турбины составляет 250,3 Вт.

Для обеспечения электрической нагрузки потребителя мощностью 3150,2 Вт возникает необходимость разработки эффективной системы, способной генерировать достаточную электрическую мощность [6, 11, 13, 14], применим в данном случае асинхронный генератор, так как он обладает рядом следующих преимуществ.

1. Асинхронные генераторы способны вырабатывать электроэнергию с переменной скоростью вращения. Гидрокинетическая турбина, которая является источником энергии в системе, имеет переменную скорость вращения в зависимости от скорости потока транспортируемой жидкости при постоянном давлении внутри трубопровода [12]. Асинхронный генератор позволяет эффективно преобразовывать кинетическую энергию вращающегося ротора турбины в электрическую энергию несмотря на переменную скорость вращения. Асинхронные генераторы обеспечивают свою способность работать с переменной скоростью вращения за счет особенностей их конструкции и принципа работы [13]. Генераторы данного типа используют асинхронный режим работы, в котором скорость вращения ротора не является жестко связанной с частотой питающей сети. Вместо этого, асинхронный генератор автоматически регулирует свою скорость вращения в зависимости от нагрузки и условий работы, подстраиваясь под переменные

параметры. Это обеспечивает стабильную и непрерывную генерацию электроэнергии даже при изменяющихся условиях работы систем [14].

2. Асинхронные генераторы надежны и просты конструкционно, не имеют коммутаторов или щеток, которые требуют постоянного обслуживания и могут быть источником неисправностей. Это позволяет снизить затраты на обслуживание и повысить надежность работы системы в целом.

3. Таким образом, для данной системы подходит асинхронный генератор со следующими характеристиками: RID RS 4540 PAE номинальная мощность: 3,2 кВт, трехфазный, номинальное напряжение 230/380В, с номинальной частотой 50 Гц, частота вращения двигателя составляет 3000 об/мин, степень защиты IP54, вид исполнения — в контейнере, с воздушной системой охлаждения.

Мультипликатор представляет собой механизм коробки передач, который увеличивает скорость вращения гидрокинетической турбины и передает эту механическую энергию вращения вала турбины на генератор, обеспечивая необходимую скорость вращения для эффективной генерации электроэнергии, процесс преобразования медленного и сравнительно низкого вращения турбины в более быстрое и высокое вращение вала генератора, что обеспечивает оптимальную эффективность и максимальную генерацию электроэнергии.

Муфта пальчиковая или ременная передача, со шкивами, установленная на выходном валу гидротурбины и входном валу мультипликатора, используется для передачи вращательного движения от гидрокинетической турбины к мультипликатору. Ее функционирование основано на использовании ремней, которые соединяют два вращающихся вала и

передают мощность от одного вала к другому.

Целью применения ременной передачи в системе генерации электроэнергии является эффективная передача крутящего момента. Ремень выполняет функцию передачи вращения, крутящего момента от приводного вала турбины к принимающему валу мультипликатора, обеспечивая непрерывную передачу мощности. Однако помимо этой основной функции ремень также выступает в роли демпфера, снижая воздействие перепадов нагрузки на систему. Ременная передача способна поглощать и смягчать неожиданные изменения в процессе работы нагрузки, рывки, но при этом обладая свойствами амортизации, тем самым предотвращая возможные повреждения механической конструкции всего изделия и компонентов системы. Такое поведение ремня позволяет обеспечить более стабильную и надежную работу системы генерации электроэнергии.

Таким образом, применение асинхронного генератора вместе с мультипликатором и ременной передачей обеспечивает эффективную систему генерации электроэнергии. Асинхронный генератор позволяет работать с переменной скоростью вращения, обеспечивая стабильную генерацию энергии, а мультипликатор и ременная передача позволяют достичь необходимой мощности и эффективно передавать вращающий момент от источника энергии к генератору [6, 11, 12].

Выводы

1. Для решения проблемы обеспечения надежного и эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопро-

водов в удаленных и труднодоступных районах, где отсутствуют сетевые источники электропитания, предложено использование гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода. Этот подход позволяет экономить материальные и экономические ресурсы по сравнению с передачей электроэнергии по линиям электропередачи и имеет важное практическое значение для обеспечения энергетической независимости и надежности в удаленных районах Крайнего Севера и Сибири.

2. Выполненные исследования оценки эффективности и надежности гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода, в контексте обеспечения эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов, позволили выполнить анализ определения минимальной мощности гидравлической турбины, рассмотреть принципиальную схему конструкции и процесс преобразования механической энергии потока нефтепровода в электрическую энергию.

3. Проведение исследования позволило получить более глубокое понимание возможностей эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов с использованием гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода.

4. Рассмотрена модель гибридной электростанции, объединяющей гидрокинетическую турбину с другими источниками энергии, такими как ветроэнергетическая установка и двигатель внутреннего сгорания, для обеспечения повышенной надежности и непрерывности электропитания в удаленных районах без сетевых источников питания.

Список источников

1. Сведения о состоянии аварийности на нефтепроводах за 12 месяцев 2020 года // Служба по контролю и надзору в сфере охраны

окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа — Югры: официальный сайт.

URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/> (дата обращения: 18.06.2023).

2. РД 2-6.2-1028-2015 «Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром» / утв. Распоряжением ПАО «Газпром» № 366: введ. в действие с 01 февраля 2016 г. М.: ООО «Газпром экспо», 2015. 69 с. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-9.2-003-2009-zashchita-ot-korrozii.-proektirovanie-e.pdf> (дата обращения: 18.06.2023).

3. Барвинов А.В. Автономное энергоснабжение линейной части нефтегазодобывающих предприятий // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: матер. Национальн. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, учёных и специалистов, посвященной 65-летию Тюменского индустриального университета, Тюмень, 27-29 октября 2021 года / Отв. редактор А.Н. Халин. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2021. С. 352–355. EDN: NGWKED.

4. Р 060-2017. Типовые проектные решения по оборудованию ПЦО системой бесперебойного электропитания: методические рекомендации. М.: ФКУ «НИЦ «Охрана» Ростгвардии, 2016. 54 с.

5. Зольников А.Е., Гладков И.Н., Леонов Е.Н. Перспективы развития распределенной генерации в нефтегазовой отрасли // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сб. матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Альметьевск, 26 ноября 2021 года. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2021. С. 373–376. EDN: RFVDYW.

6. Akhtulov A.L., Ivanova L.A., Leonov E.N. The Technique of Optimal Choice of Energy Sources in the Electrical Systems with Distributed Generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, April 04-06, 2019. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. P. 62075. doi: 10.1088/1757-899X/537/6/062075.

7. Томский манометровый завод: официальный сайт. URL: <https://www.manotom.com/catalog/elektronnye/manometry-tsifrovye/el/pretsizionnyy-tsifrovoy-manometr-dm5002m/> (дата обращения: 18.06.2023).

8. Метран: официальный сайт. URL: <https://metran.ru/catalog/pressure/metran-150/> (дата обращения: 18.06.2023).

9. Армстрой: официальный сайт. URL: [https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-](https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-osobennosti-trebovaniya/)

[osobennosti-trebovaniya/](https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-osobennosti-trebovaniya/) (дата обращения: 18.06.2023).

10. ORLESK.RU: официальный сайт. URL: <https://www.oreks.ru/funkcionalnye-bloki/rizur-mo-termochehol-s-obogrevom-dlya-datchikov-davleniya/> (дата обращения: 18.06.2023).

11. Федянин В.В. Влияние преобразователя частоты на коэффициент полезного действия асинхронного двигателя // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 08 (62). С. 83–87. doi: 10.23670/IRJ.2017.62.089.

12. Нурахмет Е.Е., Гафаров А.А., Бенке М.С., Ковалев Г.А., Макаренкова В.А. Выбор электрогенераторов для ветроэнергетических установок // Молодой ученый. 2016. № 28.2 (132.2). С. 68–79. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36983/> (дата обращения: 18.06.2023). EDN: XEOOYZ.

13. Gulliver S., Roger E.A. Hydropower Engineering Handbook. USA, McGraw-Hill Inc., 1991. 667 p. URL: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/195476> (дата обращения: 18.06.2023).

14. Leyland B. Small Hydroelectric Engineering Practice. 1st Ed. London: CRC Press, 2014. 254 p. <https://doi.org/10.1201/b16627>.

References

1. Svedeniya o sostoyanii avariinosti na nefteprovodakh za 12 mesyatsev 2020 goda [Information on the Accident Rate of Oil Pipelines for the 12 Months of 2020]. *Sluzhba po kontrolyu i nadzoru v sfere okhrany okruzhayushchei sredy, ob'ektov zhivotnogo mira i lesnykh otnoshenii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga — Yugry: ofitsial'nyi sait* [Service for Control and Supervision in the Field of Environmental Protection, Wildlife and Forestry of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra: Official Website]. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

2. РД 2-6.2-1028-2015 «Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром», утв. Распоряжением ПАО «Газпром» № 366: введ. в действие с 01 февраля 2016 г. [RD 2-6.2-1028-2015 «Categorization of Electrical Receivers of Industrial Facilities of Gazprom OJSC, Approved By Order of PJSC Gazprom No. 366: Introduced since February 1, 2016]. Moscow, ООО «Газпром экспо», 2015. 69 p. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-9.2-003-2009-zashchita-ot-korrozii.-proektirovanie-e.pdf> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

3. Barvinov A.V. Avtonomnoe energosnabzhenie lineinoi chasti neftegazodobyvayushchikh

predpriyatii [Autonomous Energy Supply of Linear Part of Oil and Gas Production Enterprises]. *Materialy Natsional'noi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh i spetsialistov «Energosberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse», posvyashchennoi 65-letiyu Tyumenskogo industrial'nogo universiteta, Tyumen', 27-29 oktyabrya 2021 goda. Otv. redaktor A.N. Khalin* [Materials of the National Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students, Scientists and Specialists with International Participation «Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex» Dedicated to the 65th Anniversary of Tyumen Industrial University, October 27-29, 2021, Tyumen / Edited by A.N. Khalin]. Tyumen, Izd-vo Tyumenskogo industrial'nogo universiteta, 2021, pp. 352–355. EDN: NGWKED. [in Russian].

4. R 060-2017. *Tipovye projektnye resheniya po oborudovaniyu PTsO sistemoi bespereboynogo elektropitaniya: metodicheskie rekomendatsii* [R 060-2017. Typical Design Solutions for Equipping UPS Systems: Methodological Recommendations]. Moscow, FKU «NITs «Okhrana» Rosgvardii, 2016. 54 p. [in Russian].

5. Zol'nikov A.E., Gladkov I.N., Leonov E.N. *Perspektivy razvitiya raspredelennoi generatsii v neftegazovoi otrasli* [Prospects for Development of Distributed Generation in the Oil and Gas Industry]. *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh «Energiya molodezhi dlya neftegazovoi industrii», Al'met'evsk, 26 noyabrya 2021 goda* [Collection of Materials of the VI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Youth Energy for the Oil and Gas Industry», Almet'yevsk, November 26, 2021.]. Al'met'evsk, Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institut, 2021, pp. 373–376. EDN: RFVDYW. [in Russian].

6. Akhtulov A.L., Ivanova L.A., Leonov E.N. The Technique of Optimal Choice of Energy Sources in the Electrical Systems with Distributed Generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, April*

04-06, 2019. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. P. 62075. doi: 10.1088/1757-899X/537/6/062075.

7. *Tomskii manometrovyi zavod: ofitsial'nyi sait* [Tomsk Pressure Gauge Plant: Official Website]. URL: <https://www.manotom.com/catalog/elektronnye/manometry-tsifrovye/el/pretsizionnyy-tsifrovoy-manometr-dm5002m/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

8. *Metran: ofitsial'nyi sait* [Metran: Official Website]. URL: <https://metran.ru/catalog/pressure/metran-150/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

9. *Armstroi: ofitsial'nyi sait* [Armstroi: Official Website]. URL: https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-osobennosti-trebovaniya/ (accessed 18.06.2023). [in Russian].

10. *ORLESK.RU: ofitsial'nyi sait* [ORLESK.RU: Official Website]. URL: <https://www.orleks.ru/funkcionalnye-bloki/rizur-m-o-termochehol-s-obogrevom-dlya-datchikov-davleniya/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

11. Fedyanin V.V. Vliyanie preobrazovatelya chastoty na koeffitsient poleznogo deistviya asinkhronnogo dvigatelya [Influence of Frequency Converter on the Efficiency of Asynchronous Motor]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal — International Research Journal*, 2017, No. 08 (62), pp. 83–87. doi: 10.23670/IRJ.2017.62.089. [in Russian].

12. Nurakhmet E.E., Gafarov A.A., Benke M.S., Kovalev G.A., Makarenkova V.A. Vybor elektro-generatorov dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [Selection of Generators for Wind Power Plants]. *Molodoi uchenyi — Young Scientist*, 2016, No. 28.2 (132.2), pp. 68–79. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36983/> (accessed 18.06.2023). EDN: XEOOYZ. [in Russian].

13. Gulliver S., Roger E.A. *Hydropower Engineering Handbook*. USA, McGraw-Hill Inc., 1991. 667 p. URL: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/195476> (accessed 18.06.2023).

14. Leyland B. *Small Hydroelectric Engineering Practice*. 1st Ed. London: CRC Press, 2014. 254 p. <https://doi.org/10.1201/b16627>.

Статья поступила в редакцию 27.09.2023; одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 10.10.2023.

The article was submitted 27.09.2023; approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 10.10.2023.